

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ВЫВОД УРАВНЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ

А. М. РОЗЕНБЕРГ и А. Н. ЕРЕМИН

До сего времени для расчета сил на резце при резании металлов пользуются эмпирическими зависимостями. Эти зависимости получаются опытным путем и дают возможность с достаточной для практики точностью рассчитывать силы резания. Для получения эмпирических зависимостей необходимо по каждому данному обрабатываемому материалу провести специальные эксперименты, которые ввиду большого числа факторов, влияющих на силы резания, получаются в достаточной степени многочисленными и трудоемкими, а также требуют специальной измерительной аппаратуры.

Назрела необходимость связать силу резания как силу, производящую деформацию металла стружки, с характеристиками прочности и пластичности обрабатываемого металла, а также с геометрическими параметрами инструмента и размерами срезаемого слоя металла. Так как процесс резания является процессом деформации металла, то возможность получения такой связи вполне вероятна. При наличии надежного уравнения, связывающего силы резания с физико-механическими характеристиками обрабатываемого металла, эксперимент по непосредственному определению сил резания трудоемкий и требующий специальной аппаратуры, станет ненужным, определение же физико-механических характеристик обрабатываемого металла не представляет сколько-нибудь существенных трудностей и осуществимо в обычной заводской лаборатории.

Процесс резания пластичных металлов является процессом пластической деформации. Работа, затрачиваемая на процесс резания, расходуется, с одной стороны, на деформацию металла стружки, с другой стороны, — на деформацию поверхностного слоя обработанного изделия. Деформация стружки производится силами, расположенными на передней грани инструмента, и эти силы зависят от размеров срезаемого слоя, степени деформации его, температурно-скоростных условий деформации и, несомненно, физико-механических характеристик обрабатываемого металла. Деформация поверхностного слоя обработанного изделия отчасти связана с деформацией стружки, отчасти осуществляется силами, расположенными на задней грани инструмента, которые являются силами упруго-пластического контакта поверхности резания с участком задней грани, непосредственно прилегающим к режущей кромке. Эти силы не зависят от толщины срезаемого слоя и степени деформации его и, как показали многочисленные опыты авторов работы, Ю. П. Зимина по стали [1], Ю. А. Розенберга по чугуну [2] (работы проведены под руководством проф. А. М. Розенберга), а также работы Н. Н. Зорева [3], очень невелики по своему значению, так что становятся заметными в сравнении с силами на передней грани лишь при чрезвычайно тонких стружках. Ими можно пренебрегать при тех толщинах срезаемого слоя, которые обычно применяются на производстве при работе резцов, сверл, зенкеров.

Представление о процессе резания как о процессе пластической деформации металла, превращаемого в стружку, позволяет предполагать, что этот процесс должен подчиняться тем же законам, которые управляют

другими видами пластической деформации—сжатием, растяжением, кручением, прокаткой, волочением и т. д. Многими опытами показано, что в процессе резания так же, как и при других видах пластической деформации, наблюдается упрочнение деформированного металла, повышение его твердости, прочности, понижение пластичности, повышение напряжений и сил резания при повышении степени пластической деформации стружки и т. д. Но если для других видов деформации к настоящему времени уже в той или иной степени установлены количественные связи между факторами процесса деформации, то для процесса резания таких количественных связей еще до сих пор не установлено.

В основу вывода теоретического уравнения сил резания, которое должно связать силы резания с физико-механическими характеристиками обрабатываемого металла, нужно положить те законы пластической деформации, которые являются общими для различных видов пластической деформации. В теории обработки металлов давлением широко применяется закон независимости потенциальной энергии изменения формы тела от механической схемы деформации [4]. Этот закон может быть сформулирован следующим образом: „Независимо от механической схемы деформации при данном температурно-скоростном режиме степень деформации однозначно связана с удельной работой изменения формы тела“. Это значит, что в различных видах деформации для достижения одинаковых (а лучше сказать „эквивалентных“) степеней пластической деформации нужно затратить равные удельные работы пластической деформации. Таким образом, если мы возьмем два процесса деформации: с одной стороны, процесс резания, а с другой стороны, процесс сжатия, растяжения, кручения и т. д., то мы можем написать условие равенства удельных работ при равенстве эквивалентных деформаций. В это равенство неизбежно войдут силы, напряжения, размеры деформируемого объема, физико-механические характеристики материала. Это позволит связать степень деформации металла в процессе резания, силы и напряжения при резании с физико-механическими характеристиками металла, определяемыми при других видах деформации.

Мы будем при выводе уравнения сил резания сравнивать процесс резания с процессом пластического сжатия, так как только при сжатии можно достигнуть столь значительных пластических деформаций, которые наблюдаются в процессе резания.

И процесс резания, и процесс сжатия являются процессами пластической деформации, протекающими путем сдвига. Поэтому эквивалентные деформации в этих двух процессах должны устанавливаться через равенство относительных сдвигов. Относительный сдвиг при резании выражается уравнением

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma), \quad (1)$$

где β_1 — угол, определяющий положение плоскости сдвига,
 γ — передний угол резца.

Относительный сдвиг при резании может быть выражен через усадку стружки ζ , если принять во внимание, что

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma}$$

и в уравнение (1) произвести соответствующие подстановки. При этом мы получим для относительного сдвига выражение

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}. \quad (2)$$

Относительный сдвиг при сжатии образца

$$\varepsilon = 1,5 \ln \frac{h_0}{h}, \quad (3)$$

где h_0 — первоначальная высота образца до сжатия,
 h — высота образца при данной степени деформации.

Приравнивая относительные сдвиги при резании и сжатии, получим

$$\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma) = 1,5 \ln \frac{h_0}{h}$$

или

$$\frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma} = 1,5 \ln \frac{h_0}{h}.$$

Отсюда нетрудно получить уравнение эквивалентных деформаций при резании и при сжатии, если степень деформации при сжатии выражать через отношение $\frac{h_0}{h}$, а при резании характеризовать усадкой стружки ζ .

$$\frac{h_0}{h} = e^{\frac{\varepsilon}{1,5}},$$

$$\frac{h_0}{h} = e^{\frac{\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma)}{1,5}}, \quad (4)$$

$$\frac{h_0}{h} = e^{\frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{1,5 \zeta \cos \gamma}}. \quad (5)$$

Здесь e — основание натуральных логарифмов.

Уравнение (5) позволяет при известных для частного случая резания значениях ζ и γ определить величину степени деформации при сжатии $\frac{h_0}{h}$, характеризующуюся одинаковым с процессом резания значением относительного сдвига.

Для вывода уравнения сил резания на принципе равенства удельных работ деформации при равных степенях деформации нужно иметь аналитические выражения для удельных работ деформации при резании и при сжатии. К выводу этих уравнений мы и перейдем.

Удельная работа деформации сдвига в процессе резания

На фиг. 1 дана схема сил, действующих на передней грани резца и осуществляющих процесс деформации стружки.

Здесь: N — сила, нормальная к передней грани,

F — сила трения,

R — равнодействующая сил на передней грани,

P_1 — сила, действующая в направлении скорости резания,

P_2 — сила, действующая в направлении, перпендикулярном к поверхности резания,

P_t — сила, действующая в плоскости сдвига,

a — толщина срезаемого слоя,

b — ширина срезаемого слоя,

η — угол трения.

Если касательное напряжение в плоскости сдвига τ , то

$$P_t = \tau \frac{ab}{\sin \beta_1},$$

$$P_t = R \cos(\omega + \beta_1),$$

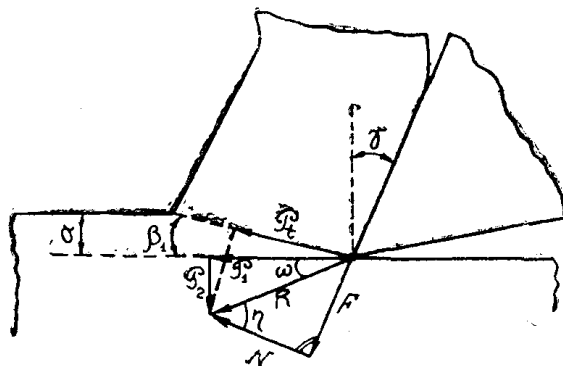
где

$$\omega = \eta - \gamma,$$

$$R = \frac{P_1}{\cos \omega} = \frac{P_2}{\sin \omega}.$$

Производя простейшие подстановки, получим:

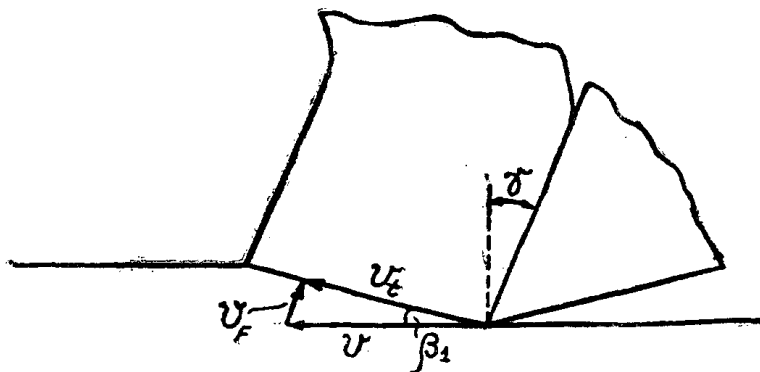
$$\tau = \frac{P_t \sin \beta_1}{ab} = \frac{P_1 \sin \beta_1 \cos(\omega + \beta_1)}{ab \cos \omega} = \frac{P_2 \sin \beta_1 \cos(\omega + \beta_1)}{ab \sin \omega}.$$



Фиг. 1

Здесь τ касательное напряжение при резании дано в зависимости от сил P_1 и P_2 , которые могут быть определены опытом, и углов β_1 и ω , причем угол β_1 может быть рассчитан из усадки стружки, измеренной непосредственно на стружке, угол ω определяется через выражение

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{P_2}{P_1}.$$



Фиг. 2

На фиг. 2 мы даем картину скоростей.
Здесь v — скорость резания,
 v_t — скорость сдвига,
 v_F — скорость трения.

Вектор скорости трения направлен параллельно передней грани резца. Нетрудно получить следующие выражения для скоростей v_t и v_F

$$v_t = v \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma)},$$

$$v_F = v \frac{\sin \beta_1}{\cos(\beta_1 - \gamma)}.$$

Но

$$\frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} = \zeta,$$

поэтому

$$v_F = \frac{v}{\zeta}.$$

Удельная работа деформации сдвига при резании

$$A_{w_t} = \frac{P_t \cdot v_t}{abv} = \frac{P_1 \cos(\omega + \beta_1) \cdot \cos \gamma}{ab \cos \omega \cdot \cos(\beta_1 - \gamma)}. \quad (7)$$

Если выразим удельную работу через напряжение сдвига

$$\tau = \frac{P_1}{ab} \frac{\sin \beta_1 \cos(\omega + \beta_1)}{\cos \omega},$$

то получим

$$A_{w_t} = \tau \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma) \cdot \sin \beta_1}.$$

В этом выражении

$$\frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma) \cdot \sin \beta_1} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg}^2 \beta_1 \operatorname{tg} \gamma}.$$

Подставляя

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma},$$

получим

$$\frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma) \sin \beta_1} = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma} = \varepsilon.$$

Таким образом, удельная работа сдвига

$$A_{w_t} = \tau \cdot \varepsilon. \quad (8)$$

Удельная работа трения

$$A_{w_F} = \frac{F v_F}{abv} = \frac{P_1 \sin \eta \sin \beta_1}{ab \cos \omega \cos(\beta_1 - \gamma)},$$

где угол трения $\eta = \omega + \gamma$.

Если мы сложим обе удельные работы, то получим

$$A_{w_t} + A_{w_F} = \frac{P_1}{ab} \left\{ \frac{\cos(\omega + \beta_1) \cos \gamma + \sin(\omega + \gamma) \sin \beta_1}{\cos \omega \cos(\beta_1 - \gamma)} \right\}.$$

Сомножитель в фигурных скобках превращается в единицу, и поэтому

$$A_{w_t} + A_{w_F} = \frac{P_1}{ab} = \frac{P_1 v}{abv} = A_w.$$

Таким образом, сумма удельных работ деформации сдвига и трения равняется общей удельной работе резания. Отсюда для удельной работы сдвига можно получить следующее выражение

$$A_{w_t} = A_w - A_{w_F} = \frac{P_1}{ab} \left\{ 1 - \frac{\sin \eta \sin \beta_1}{\cos \omega \cos(\beta_1 - \gamma)} \right\}$$

и так как

$$\frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} = \zeta,$$

то

$$A_{w_t} = \frac{P_1}{ab} \left\{ 1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos \omega} \right\}. \quad (9)$$

Это выражение в дальнейшем будет удобно использовать для некоторых выводов.

Общая удельная работа A_w при резании является суммой удельных работ деформации пластического сдвига A_{w_t} и трения A_{w_F} . Значит, общая работа резания является суммой работ сдвига и трения

$$A = A_t + A_F.$$

Работа сдвига A_t производит процесс сдвига стружки и создает ту или иную величину относительного сдвига ε и соответствующую ей усадку стружки ζ . Работа трения A_F расходуется на преодоление сил трения между стружкой и передней гранью резца. Работа трения также деформирует стружку, но эта деформация является вторичной, захватывает лишь тонкий слой стружки, прилегающий к передней грани резца, не распространяется на весь объем металла стружки, не изменяет усадки стружки и величины относительного сдвига в ней. Поэтому степень деформации стружки, рассчитанная по продольной усадке ее, создается работой сдвига A_{w_t} .

Для удельной работы деформации сдвига нами получено выражение

$$A_{w_t} = \tau \varepsilon.$$

Это выражение само по себе представляет значительный интерес. Если считать, что в процессе резания при данном температурно-скоростном режиме касательное напряжение τ для упрочняющегося металла должно быть однозначно связано с деформацией ε , так что независимо от внешних условий резания (различные передние углы, различные условия трения стружки по передней грани) каждому значению ε соответствует определенная величина τ , то и удельная работа деформации A_{w_t} будет иметь определенное значение для каждого ε . Таким образом, для процесса резания оказывается действительным закон независимости удельной работы деформации сдвига от внешних условий резания. Это положение, конечно, требует экспериментальной проверки, которая нами в дальнейшем изложении будет дана. Экспериментальная проверка этого положения чрезвычайно проста. При правильности высказанного положения все экспериментальные точки опытов, удовлетворяющих условию постоянства температурно-скоростного режима, должны в координатах $A_{w_t} - \varepsilon$ дать одну единственную кривую, независимо от условий проведения опыта.

Обратимся теперь к удельной работе пластического сжатия.

Удельная работа пластического сжатия

Общая работа деформации сжатия образца может быть определена измерением площади диаграммы „Сила сжатия—деформация сжатия“. Для аналитического расчета необходимо решить интеграл

$$A_g = \int_{h_0}^h Q dh,$$

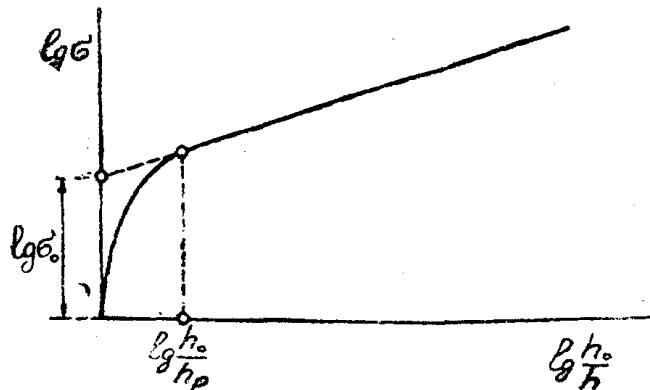
где Q — сила сжатия в данный момент.

Для решения необходимо знать закон роста напряжения с ростом деформации.

Если принять степенной закон зависимости истинного напряжения от деформации, то кривая напряжение—деформация может быть представлена известной политропой сжатия

$$\sigma_1 = \sigma_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^n, \quad (10)$$

которая не является абсолютно точной, но практически дает хорошие результаты [5].



Фиг. 3

Здесь σ — истинное напряжение в данный момент при данной степени деформации $\frac{h_0}{h}$,

σ_0 — условный предел текучести, напряжение, которое имело бы место в начальный момент деформации при $h = h_0$, если бы политропический закон был справедлив с самой начальной стадии деформации,

n — показатель политропы напряжений, величина постоянная для данных температурно-скоростных условий деформации.

Уравнение (10) представлено на фиг. 3 в логарифмических координатах $\lg \frac{h_0}{h} - \lg \sigma$.

Зависимость (10) верна только для прямолинейной части. Прямая, будучи продолжена до оси напряжений, дает отрезок σ_0 — условный предел текучести. Прямолинейная часть кривой начинается с деформации $\frac{h_0}{h_p}$. До

этой деформации расположена дополитропическая часть кривой. Профессор-доктор М. А. Большанина [5] на основании опытов Кунина дает уравнение удельной работы деформации при сжатии

$$A_{w_{сж}} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ \left(\frac{h_0}{h} \right)^n - \left(1 - \chi \right) \left(\frac{h_0}{h_p} \right)^n - \chi \right\}. \quad (11)$$

Здесь K — коэффициент полноты, который учитывает характер дополитропической части кривой, представляет собой отношение истинной работы в дополитропической части к той работе, которая потребовалась бы, если бы политропическая зависимость была справедлива с самого начала деформации. Значения κ и $\frac{h_0}{h_p}$ для различных металлов и их состояний (температура, наклеп, структура) могут быть получены лишь опытным путем.

Если считать, что закон политропы начинает действовать с самого начала деформации, то $\kappa = 1$ и

$$A_{w_{ож}} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ \left(\frac{h_0}{h} \right)^n - 1 \right\}.$$

Удельная работа по уравнению (12) всегда больше, чем по уравнению (11), но разница между ними будет тем менее заметна, чем больше степень деформации $\frac{h_0}{h}$. Обычно наблюдаемые при резании усадки стружки экви-

валентны столь значительным степеням деформации при сжатии, что разница между (12) и (11) оказывается меньше 1%. Так, если взять для переднего угла резца $\gamma = 0^\circ$ значение $\zeta = 2$ (обычно усадка всегда больше двух), то этому будет соответствовать $\frac{h_0}{h} = 5,4$ и разница между (12) и (11) будет меньше 0,5%. Поэтому для дальнейших выводов возьмем уравнение (12).

Можно считать, что это уравнение дает величину удельной работы пластической деформации при сжатии и не включает в себя работу трения, ибо при сжатии, хотя трение на торцах и имеет место, но работа трения почти отсутствует, так как нет (или почти нет) перемещений в направлении сил трения. На то, что работой трения при сжатии можно пренебречь, указывают опыты по сжатию, проведенные без смазки и со смазкой. Так, член-корреспондент АН СССР В. Д. Кузнецов пишет относительно влияния смазки на политропу сжатия стали У—8:

„Опыты со сжатием проводились со смазкой, применявшейся при резании, и без смазки. Заметного влияния смазки на m и σ_0 не было обнаружено“ [6].

То же самое показали опыты Иванова по сжатию со смазкой и без смазки медных образцов [7].

Совершенно аналогичные результаты были получены и в работе Большаниной и Студенок при сжатии алюминия без смазки и со смазкой керосином, а также спиртом с 0,1% стеариновой кислоты [8].

При резании, наоборот, работа трения составляет заметную часть общей работы, так как там мы имеем и очень высокие коэффициенты трения (они в 2—5 раз выше, чем при сжатии) и постоянное движение с значительной скоростью в направлении силы трения. Поэтому удельную работу при сжатии мы будем приравнивать не всей удельной работе при резании, а лишь части ее, равной удельной работе деформации сдвига A_{w_t} :

$$A_{w_{ож}} = A_{w_t}.$$

Написав равенство между этими удельными работами, получим

$$\frac{\sigma_0}{n} \left\{ \left(\frac{h_0}{h} \right)^n - 1 \right\} = \frac{P_1}{ab} \left\{ 1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos \omega} \right\}. \quad (13)$$

Здесь по предыдущему

$$\left(\frac{h_0}{h} \right)^n = e^{\frac{\pi \varepsilon}{1,5}},$$

и поэтому

$$P_1 = \frac{\sigma_0}{n} ab \frac{e^{\frac{n s}{1.5}} - 1}{1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}} \quad (14)$$

или в более развернутом виде, так как

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cdot \cos \gamma},$$

то

$$P_1 = \frac{\sigma_0}{n} ab \frac{e^{\frac{n}{1.5} \cdot \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1}{1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}}. \quad (15)$$

Это уравнение может быть представлено и в несколько ином виде, если для равенства удельных работ использовать уравнение (7)

$$\frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n s}{1.5}} - 1 \right\} = \frac{P_1}{ab} \frac{\cos(\omega + \beta_1) \cos \gamma}{\cos \omega \cdot \cos(\beta_1 - \gamma)}.$$

Здесь сомножитель в правой части может быть приведен к выражению

$$\frac{\cos \omega \cdot \cos(\beta_1 - \gamma)}{\cos(\omega + \beta_1) \cos \gamma} = \frac{\zeta}{\zeta - \sin \gamma - \cos \gamma \operatorname{tg}(\eta - \gamma)},$$

тогда

$$P_1 = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n}{1.5} \cdot \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1 \right\} \frac{ab \zeta}{\zeta - \sin \gamma - \cos \gamma \operatorname{tg}(\eta - \gamma)}. \quad (16)$$

Конечно, как уравнение (15), так и (16) дают численно одни и те же результаты.

Оба эти уравнения показывают, что сила P_1 определяется физическими характеристиками обрабатываемого материала σ_0 и n , размерами снимаемого слоя a и b , передним углом резца γ , углом трения η , усадкой стружки ζ .

Естественно, что сила P_1 будет зависеть и от тех факторов, которые в той или иной мере оказывают влияние на величины σ_0 и n . Так, например, температура и скорость деформации для различных материалов по различному оказывают влияние на σ_0 и n , через σ_0 и n они будут соответственно оказывать влияние и на силу P_1 . Можно заранее предугадать, что, например, для тугоплавких металлов влияние скорости разания, как скорости деформации, должно оказывать менее существенное влияние на силу резания, чем для легкоплавких, ибо именно таково влияние скорости деформации на σ и n . Конечно, если при изменении скорости резания будут изменяться коэффициент трения (угол трения) или усадка стружки, или и то и другое вместе, то это неизбежно вызовет изменение силы резания, но это изменение уже не будет являться результатом изменения скорости деформации.

От уравнений для силы P_1 не представляет затруднения перейти к уравнению для P_2 , так как по фиг. 1

$$P_2 = P_1 \cdot \operatorname{tg} \omega$$

или

$$P_2 = P_1 \operatorname{tg}(\eta - \gamma).$$

Поэтому для силы P_2 может быть написано следующее уравнение

$$P_2 = \frac{\sigma_0}{n} ab \sin(\eta - \gamma) \frac{e^{\frac{n}{1.5} \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1}{\cos(\eta - \gamma) - \frac{\sin \eta}{\zeta}}. \quad (17)$$

Сила P_2 , таким образом, будет зависеть от тех же величин, что и P_1 , что вполне логично, так как обе эти силы являются составляющими одной равнодействующей R .

Силы P_1 и P_2 , которые могут быть рассчитаны по уравнениям (15) и (17), являются силами, расположенными на передней грани реза, осуществляющими деформацию срезаемого слоя металла.

Для дальнейшего анализа полученных уравнений и для сравнения их с результатами опытов удобно иметь зависимость для напряжения сдвига при резании, выраженную через физические константы обрабатываемого металла. Такое уравнение мы получим, приравняв (8) и (12)

$$\frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n\epsilon}{1.5}} - 1 \right\} = \tau \epsilon.$$

Отсюда напряжение сдвига при резании

$$\tau = \frac{\sigma_0}{n\epsilon} \left\{ e^{\frac{n\epsilon}{1.5}} - 1 \right\}. \quad (18)$$

Для металла неупрочняющегося, для которого рост деформации не сопровождается возрастанием напряжений,

$$n = 0$$

и

$$\tau = \sigma_0 \cdot \frac{0}{0}.$$

Раскрыв эту неопределенность, используя правило Лопиталья, получим

$$\tau = \frac{2}{3} \sigma_0 = \text{const}$$

и сила P_1 для неупрочняющегося металла получит выражение

$$P_1 = \frac{2}{3} \sigma_0 ab \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\cos \gamma (\zeta - \sin \gamma - \cos \gamma \operatorname{tg} \omega)}. \quad (19)$$

Экспериментальная проверка уравнений сил резания

Экспериментальная проверка нами проводилась по трем металлам: по стали, свинцу и алюминию. Наибольшее число опытов было проведено по стали. Этот металл интересовал нас потому, что он имеет наибольшее практическое применение. Кроме этого, сталь характерна тем, что, имея высокую температуру плавления, она проявляет малую чувствительность напряжения к скорости деформации как при резании, так и при других методах пластической деформации, что нами было подтверждено специальными опытами. Поэтому в опытах при постоянном температурном режиме мы могли не учитывать влияния скорости на напряжение при резании. При деформации алюминия скорость деформации оказывает малое, но уже заметное влияние на напряжение, при деформации свинца это влияние еще

более значительно. Поэтому для этих металлов пренебрегать влиянием скорости нельзя, и его нужно учитывать. Свинец был для нас интересен потому, что в условиях постоянной скорости деформации он является уже при комнатной температуре металлом не упрочняющимся, т. е. у него напряжение не зависит от степени деформации ($n=0$).

Для экспериментальной проверки уравнений сил резания мы должны были определить параметры процесса резания, входящие в уравнения (ω , η , γ , β_1), и параметры процесса сжатия (σ_0 , n). Здесь прежде всего следует остановиться на вопросе, как мы определяли угол трения η и угол сдвига β_1 при резании.

Для определения угла трения η и коэффициента трения стружки по передней грани резца необходимо было выделить из сил, измеренных динамометром, силы, приложенные на передней грани резца. Для этого мы пользовались методикой, описанной нами [9].

Таким образом, измерив динамометром силы P_z и P_x (при свободном резании) и вычтя из них силы на задней грани, мы получали силу P_1 , приложенную на передней грани и действующую в направлении скорости резания, и силу P_2 , также действующую на передней грани резца в направлении, перпендикулярном к поверхности резания. Если мы будем условно считать все силы приложенными к режущей кромке, то не представит затруднений получить следующие соотношения:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{P_2}{P_1},$$

$$\eta = \omega + \gamma.$$

Таким образом, для определения угла трения η нужно определить угол ω и знать передний угол γ у резца. Конечно, таким путем мы можем определить лишь некоторый средний угол трения, тогда как в действительности коэффициент трения и угол трения по площади контакта стружки с передней гранью резца несомненно являются переменными. Для определения закона распределения коэффициента трения по площади контакта мы не имеем данных и поэтому приходится пользоваться средними величинами.

Так как для определения η необходимо знать γ — передний угол резца, то опыты должны были проводиться в тех зонах скоростей резания, в пределах которых не образуется нарост на передней грани, который изменяет, как известно, и геометрию резца и действительный передний угол в широких пределах.

В соответствии с этим при резании стали опыты проводились нами или при очень низких скоростях от 0,0003 до 0,76 м/мин (эти скорости мы называем микроскоростями), или при столь высоких, при которых образование нароста также не наблюдалось. Опыты с микроскоростями представляли еще то несомненное преимущество, что в пределах их, указанных выше, влияние температуры на процесс резания исключалось, так как все тепло, являющееся результатом затраченной работы, при этих скоростях свободно рассеивается и не нагревает сколько-нибудь заметно ни стружку, ни металл, с которого снимается стружка. Это являлось существенным еще и потому, что сжатие нами проводилось при комнатной температуре, и строгое сравнение с ним процесса резания требовало выполнения последнего также без заметного нагрева стружки и металла, с которого они снимались.

Для определения угла β_1 измерялась продольная усадка стружки ζ и ширина ее b_1 ; угол β_1 рассчитывался по зависимости

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{b}{b_1} \zeta - \sin \gamma}.$$

Свободное резание при микроскоростях осуществлялось строганием на фрезерном станке, причем кусок обрабатываемого металла, с которого снималась стружка, укреплялся в специальных тисках на столе фрезерного станка и от механизма подачи его получал движение и скорость резания. Резец при этом укреплялся в специальном чрезвычайно точном и чувствительном упругом двухкомпонентном динамометре, который в свою очередь привертывался к траверзе станка.

При высоких скоростях резания опыты проводились на токарном станке, причем стружка снималась резцом, имеющим угол в плане $\varphi = 90^\circ$, с торца стакана продольной подачей резца. В этом случае силы резания измерялись гидравлическим динамометром.

При работе на микроскоростях стружка снималась с длины полоски металла в 60—80 мм, и таким образом для вычисления усадки путь, пройденный резцом, был известен. При работе на токарном станке снималась непрерывная стружка, и путь, пройденный резцом при снятии отрезка стружки, взятого для вычисления усадки, определялся методом взвешивания отрезка стружки.

Перед снятием каждой стружки резец обязательно доводился по всем граням пастой ГОИ, так чтобы на режущей кромке не было совершенно никаких дефектов.

1. Опыты по резанию стали

Основные опыты, проведенные нами для проверки уравнений, были выполнены по стали 40 на микроскоростях.

Опыты проводились с широким диапазоном изменения передних углов от -1° до 40° , со смазкой и без смазки, с широким диапазоном изменения скорости резания. Во всех опытах снималась только чисто сливная стружка, без каких бы то ни было признаков растрескивания и деления на элементы, так как наблюдения показали, что при появлении этих признаков процесс резания искажается, усадка стружки не может быть точно определена, коэффициент трения падает и т. д.

На фиг. 4 представлен один из графиков сил резания и усадок стружки полученных нами на микроскоростях. Каждая точка этого графика есть среднее значение из 5—15 отсчетов, сделанных визуально на протяжении всего периода снятия данной стружки. По точкам, таким образом полученным, проведены средние кривые, дающие зависимость сил резания от толщины стружки (толщина среза). По точкам усадки проведены кривые зависимости усадки от толщины среза.

По каждой из таких кривых нами взяты значения сил резания и усадок, для определенной, выбранной нами толщины среза, и по этим значениям рассчитаны все интересующие нас величины (ω , η , β_1 , ϵ , τ). Эти величины помещены в табл. 1. Таким образом, каждое из значений, помещенных в табл. 1, является средним результатом из большого числа опытов.

В табл. 2 помещены результаты опытов, проведенных на высоких скоростях резания, без нароста, методом свободного резания.

Для определения параметров политропы сжатия нами проводилось сжатие цилиндров с соотношением высоты h_0 к диаметру d_0 (начальные их

значения до сжатия) $\frac{h_0}{d_0} = 2,5$. Такое значительное отношение было выб-

рано нами с целью снижения влияния трения на торцах на напряженное состояние. Сжатие производилось в специальной направляющей гильзе, чтобы предотвратить возможность перекоса сжимаемых образцов.

Таблица 1

Передний угол	Скорость резания м/мин v	α	b	P_1	P_2	ζ	ϵ	ω	β_1	τ	Условия опыта
40°	0,0048—0,76	0,1	3,0	30	—10	1,62	1,24	—18°25'	38°10'	60,6	Смазка мыльная вода
"	0,0048	"	"	25	—12	1,53	1,16	—25°40'	40°50'	60,4	Растит. масло
"	0,035	"	"	29,5	—11	1,6	1,24	—20°50'	38°50'	62,2	" "
"	0,098	"	"	33,5	—9	1,6	1,24	—15°	38°50'	66	" "
"	0,76	"	"	38	—6,5	1,73	1,33	—9°30'	35°20'	67,5	" "
"	0,0009	0,2	3,0	70,5	—10	1,82	1,41	—8°	33°10'	58,7	Без смазки
"	0,0048	"	"	78,5	—7	"	"	—5° 5'	"	63,5	" "
"	0,035	"	"	83,5	—3,5	"	"	—2° 30'	"	65,3	" "
"	0,098	"	"	87,5	0	"	"	0	"	67,0	" "
"	0,760	0,1	"	46	3,5	"	"	4° 20'	"	66,5	" "
30°	0,0009—0,76	0,2	3,1	74,5	—11,7	1,9	1,64	—8° 55'	31°50'	59	Мыльная вода
"	"	0,1	3,1	40	—5,5	1,94	1,69	—7° 50'	31°	61,5	" "
"	0,0003—0,098	0,2	3,05	95	+2,5	2,12	1,84	1° 30'	28°10'	62,0	Машин. масло
"	0,0003—0,0048	"	"	62,5	—16,5	1,8	1,56	—14°45'	33°45'	56,0	Растит. масло
"	0,035—0,098	"	"	65	—16,5	1,8	1,56	—14°15'	33°45'	58,0	" "
"	0,0011	"	"	92,5	+5,2	2,2	1,91	+3° 15'	27°	60,0	Без смазки
"	0,0048	"	"	100	9,0	2,3	1,99	+5° 10'	25°45'	62,0	"

Продолжение таблицы 1.

Передний угол	Скорость резания м/мин v	a	b	P_1	P_2	ζ	α	ω	β_1	τ	Условия опыта
30°	0,035	0,2	3,05	112	15,0	2,4	2,1	7°40'	24°30'	66,0	Без смазки
"	0,093	"	"	121	19,0	2,55	2,25	8°55'	22°55'	66,7	"
20°	0,00088—0,76	0,3	3,1	112	— 8,0	1,9	1,65	—4°45'	31°45'	55,5	Мыльная вода
20°	0,00088—0,76	0,2	3,0	82	— 8,5	2,1	1,99	—5°55'	28°10'	60,2	Мыльная вода
"	"	0,1	3,0	45	— 4,0	2,2	2,1	—5°5'	26°45'	63,0	"
"	"	0,27	3,0	106,5	—11,5	2,0	1,93	—6°10'	29°30'	59,7	"
"	0,00088	0,1	"	60	9,5	2,8	2,64	+ 9°	20°55'	62	Без смазки
"	0,0048	"	"	64	12,5	2,85	2,68	11°	20°30'	64,6	"
"	0,035	"	"	72,5	18	3,1	2,92	14°	18°50'	67,6	"
"	0,098	"	"	76,5	21	3,1	2,92	15°20'	18°50'	70,4	"
"	0,280	0,11	"	89,0	27	3,25	3,05	18°45'	17°50'	69,8	"
22°	0,0011—0,0045	0,15	3,0	58,5	— 7,5	2,1	2,02	—7° 20'	27°30'	57	Растит. масло
"	0,033	"	"	61,0	— 7,5	2,1	2,02	—7°	27°30'	59	"
"	0,098—0,28	"	"	64,0	— 7,5	2,1	2,02	—6°40'	27°30'	61,5	"
14°	0,09	0,1	3,0	47,5	1,5	2,27	2,3	2°	25°30'	60,6	Смазка
8°30'	0,0008—0,76	0,15	3,0	84	7,5	2,55	2,68	5°	22°25'	63,7	Мыльная вода
"	"	0,1	"	61	8,5	2,8	2,89	7°55'	20°25'	63,2	"
"	"	0,05	"	34	4,5	2,95	3,04	7°35'	19°20'	68,0	"
—1°	0,035	"	"	43	12	3,4	3,74	15°30'	16°15'	71	Мыльная вода
"	"	0,064	"	49	13	3,19	3,51	14°50'	17°25'	67,0	"
"	"	0,04	"	34	9,5	3,5	3,8	15°40'	16°	68,9	"

Таблица 2

γ	ν	α	b	P_1	P_2	ζ	ε	ω	β_1	τ	b_1	
30°	41	0,214	3,0	100	20,6	1,8	1,47	11°40'	36°25'	63	3,15	Без смазки
„	52	„	„	100	20,4	2,08	1,41	11°30'	30°20'	59,7	3,15	„
20°	51,5	„	„	112	39,5	2,29	2,11	19°26'	26°40'	58	3,15	„
„	67,3	„	„	130	57	2,63	2,16	23°40'	26°	63,4	3,2	„
9°	26,6	„	„	210	150	4,95	3,7	35°40'	15°35'	68,7	4	„
0°	39	„	„	232	202	5,24	4,0	41°	15°	69,5	4,2	„

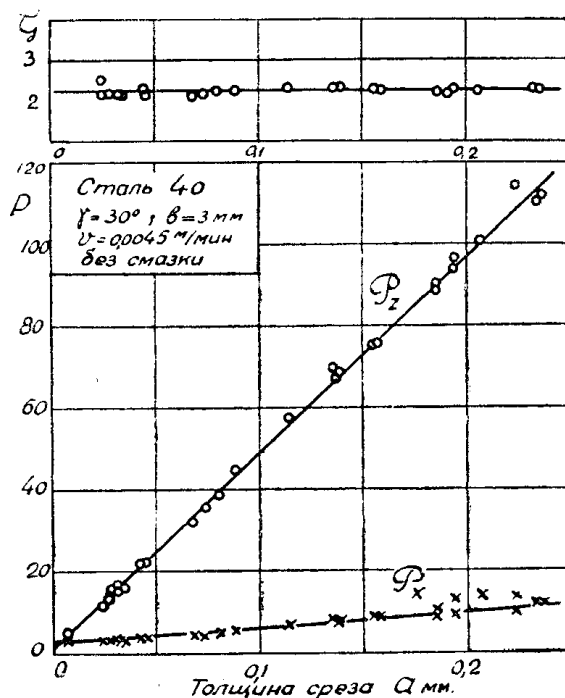
ПРИМЕЧАНИЕ: При расчете β_1 , ε и τ принято во внимание уширение стружки. Величина β_1 определялась по зависимости

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{b}{b_1} \zeta - \sin \gamma}.$$

На фиг. 5 приведена диаграмма сжатия. По этой диаграмме получены константы, входящие в уравнение политропы сжатия

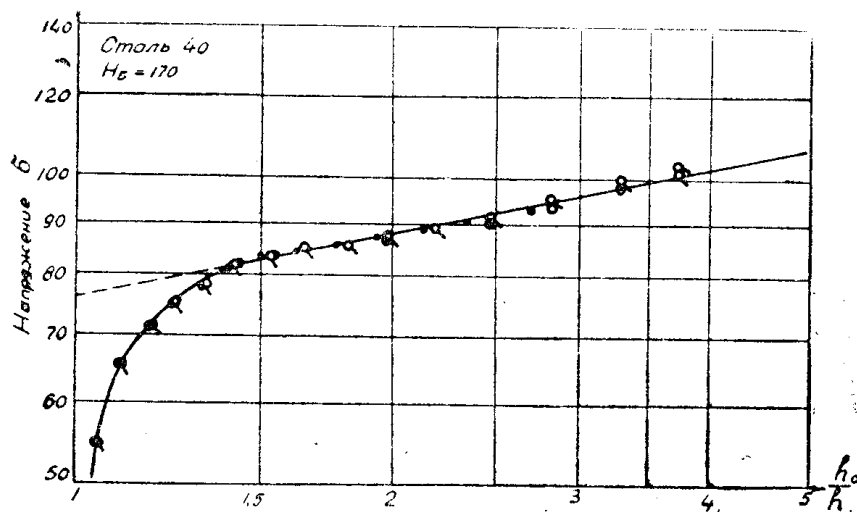
$$\sigma_0 = 75,5; m = 1,226; n = 0,226.$$

Для того чтобы проверить, насколько значительно трение на торцах при сжатии отразилось на полученных константах, мы воспользовались методом, предложенным Шофманом [10]. Для этого были подвергнуты сжа-



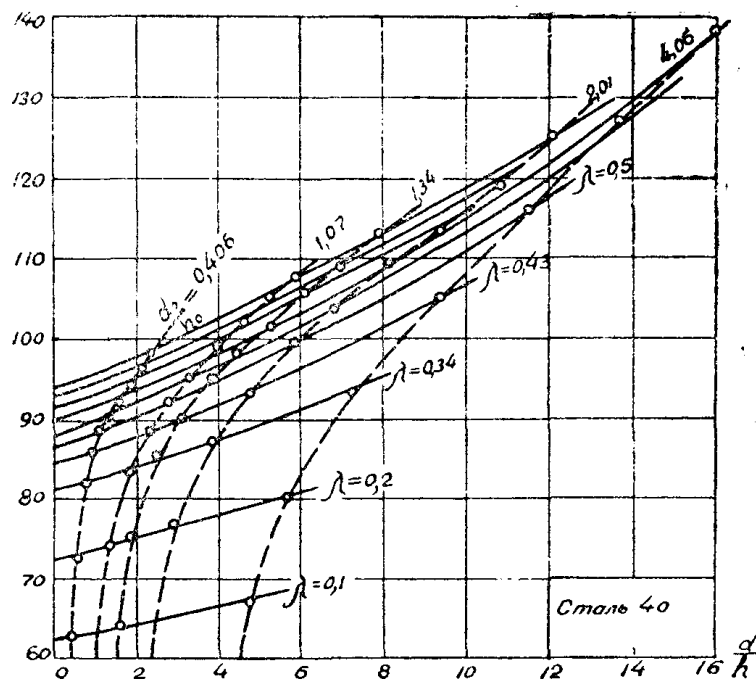
Фиг. 4

тию образцы с различным отношением $\frac{d_0}{h_0}$: 4,5; 2,5; 1,5; 1,0; 0,4. На фиг. 6 представлены кривые напряжений, полученные для этих различных образцов. Через точки кривых, соответствующие равным относительным деформациям $\left(\lambda = 1 - \frac{h}{h_0}\right)$, проведены кривые, которые плавно доведены до



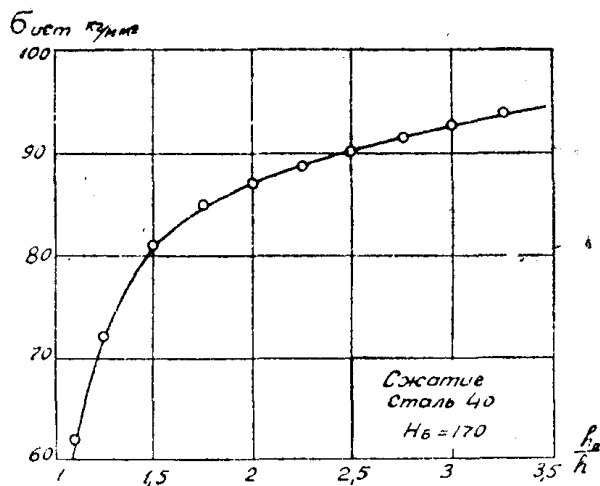
Фиг. 5

пересечения с осью ординат, на которой они отсекают напряжения (σ), соответствующие определенной степени деформации при отношении $\frac{d}{h} = 0$, т. е. при отсутствии трения на торцах.



Фиг. 6

По этим напряжениям ($\sigma_{ист}$) построена кривая фиг. 7, которая дает напряжения при сжатии при условии отсутствия трения на торцах. Если мы сравним эту кривую с кривой фиг. 5, полученной для образцов с начальным

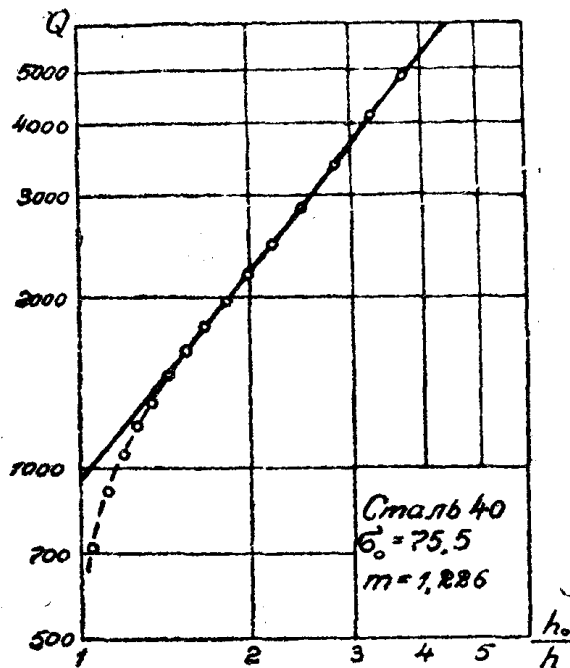


Фиг. 7

отношением $\frac{h_0}{d_0} = 2,5$, то мы можем убедиться, что при столь большом отношении трение на торцах почти не влияет на величину напряжений.

На фиг. 8 приведена кривая деформирующих сил при сжатии.

На основании табл. 1 и 2 на фиг. 9 нами нанесены в координатах ε — τ (сдвиг—напряжение) точки, полученные из опытов по резанию, причем кружками обозначены результаты, полученные при микроскоростях, крестиками—при высоких скоростях резания. На этом же рисунке сплошной

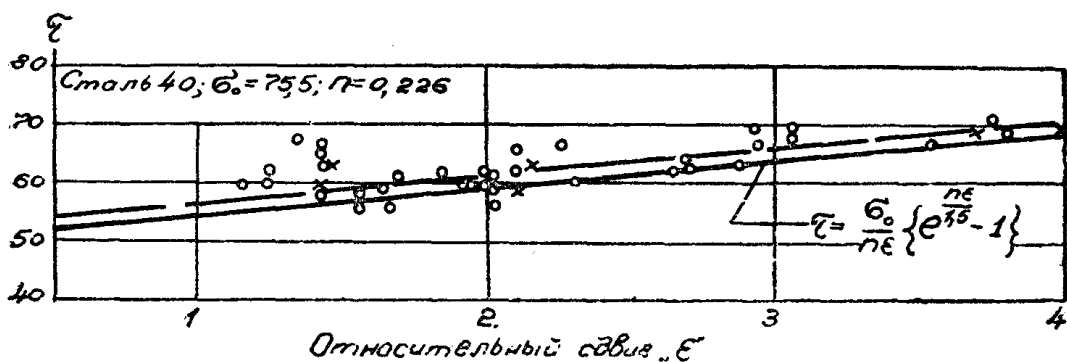


Фиг. 8

линией построена зависимость $\tau = f(\varepsilon)$, полученная при сжатии и выражаемая уравнением

$$\tau = \frac{\sigma_0}{n\varepsilon} \left\{ e^{\frac{n\varepsilon}{1.5}} - 1 \right\}.$$

Фиг. 9 показывает, что кривая по этой зависимости хорошо располагается относительно опытных точек, будучи лишь снижена относительно



Фиг. 9

их в среднем на 3—4%. На фиг. 9 проведена средняя по опытным точкам прерывистая кривая, которая оказывается на эти 3—4% выше кривой, проведенной по уравнению.

Таким образом, удовлетворительно соответствует результатам опытов теоретически выведенное уравнение для силы резания

$$P_1 = \frac{\sigma_0}{n} ab \frac{e^{\frac{n}{1.5} \cdot \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1}{1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}},$$

где σ_0 — условный предел текучести при сжатии,
 n — показатель политропы напряжений при сжатии,
 ζ — усадка стружки,
 a, b — размеры сечения среза,
 γ — передний угол резца,
 η — угол трения стружки по передней грани резца.

На фиг. 9 крестиками нами показаны результаты опытов, проведенных на высоких скоростях резания, за областью образования нароста. Несмотря на совершенно иной термический режим деформации, результаты этих опытов уложились хорошо на ту же среднюю линию, которая соответствует опытам, проведенным при микроскоростях. Таким образом, опытам, проведенным на высоких скоростях, удовлетворяет то же самое уравнение силы резания.

Ранее нами было указано, что в процессе резания удельная работа деформации пластического сдвига A_{w_t} равна произведению касательного напряжения τ на относительный сдвиг ε

$$A_{w_t} = \tau \varepsilon. \quad (8)$$

Мы отметили, что эта зависимость сама по себе представляет существенный интерес, так как она показывает, что для процесса резания оказывается действительным закон независимости удельной работы изменения формы от схемы деформации. Мы указали, что это положение требует экспериментальной проверки.

Для экспериментальной проверки нужно результаты опытов отразить в координатах $A_{w_t} - \varepsilon$. Так как $\tau = f(\varepsilon)$, то в этом графике все опыты, проведенные при различных значениях γ с различными коэффициентами трения μ и усадками стружки ζ , должны для данного температурно-скоростного режима деформации уложиться на одну единственную кривую $A_{w_t} = f(\varepsilon)$. Кривая $A_{w_t} = f(\varepsilon)$ должна удовлетворять уравнению

$$A_{w_t} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n\varepsilon}{1.5}} - 1 \right\} \quad (20)$$

и может быть построена по значениям σ_0 и n , определенным из опытов по сжатию.

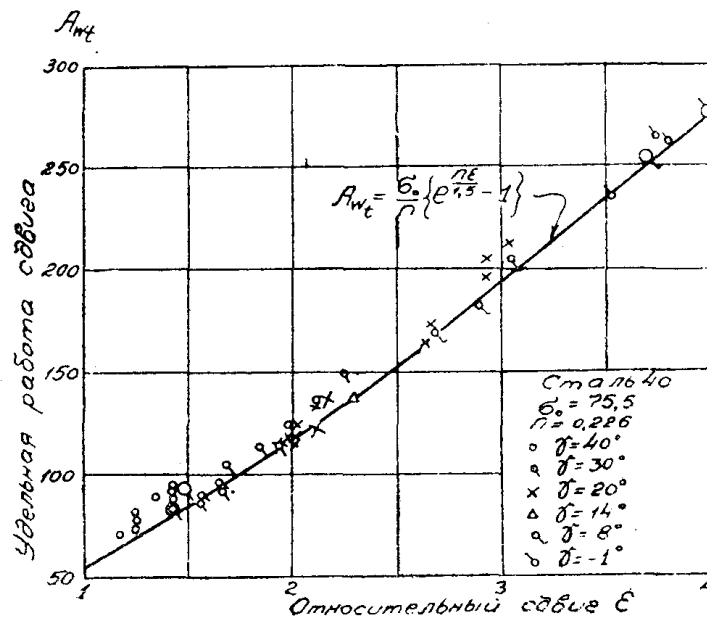
Для случая резания стали на эту же кривую должны уложиться и точки всех опытов, проведенных на различных микроскоростях, так как для стали скорость деформации оказывает незаметное влияние на напряжение при условии постоянства температурного режима деформации.

Такой график для стали 40 представлен нами на фиг. 10.

Здесь сплошная кривая построена по уравнению (20) с использованием значений σ_0 и n , полученных из опытов по сжатию. Как показывает график, все опытные точки расположились в среднем немного выше кривой, но совершенно отчетливо повторяют ее характер, что служит хорошим доказательством правильности уравнения (8). На фиг. 10 крупными кружками и крестиками показаны результаты опытов, проведенных на высоких скоростях резания. Как мы видим, эти опыты также уложились в общую закономерность.

Может возникнуть вполне естественный вопрос, почему опыты, проведенные на высоких скоростях резания, дают напряжения и удельные работы такие же, как в опытах, проведенных на микроскоростях, хотя при высоких скоростях температура в зоне деформации стружки несомненно выше, чем при микроскоростях.

По этому поводу можно высказать два предположения. Одно предположение заключается в том, что тепло, выделяющееся в зоне деформации (и в результате самой деформации) при высоких скоростях не успевает создать условия осуществления процесса отдыха, ввиду того, что каждый микрообъем металла находится в процессе деформации под воздействием этого тепла чрезвычайно короткий отрезок времени (тысячные и десятитысячные доли секунды), проходя через зону деформации с большой скоростью. Другое предположение заключается в том, что температура в зоне деформации, высокая при значительных скоростях резания, могла бы снизить напряжение, но при высоких температурах начинает сказываться влияние скорости деформации, которая повышает напряжение, тем самым уравнивая в той или иной степени влияние температуры, снижающей напряжение.

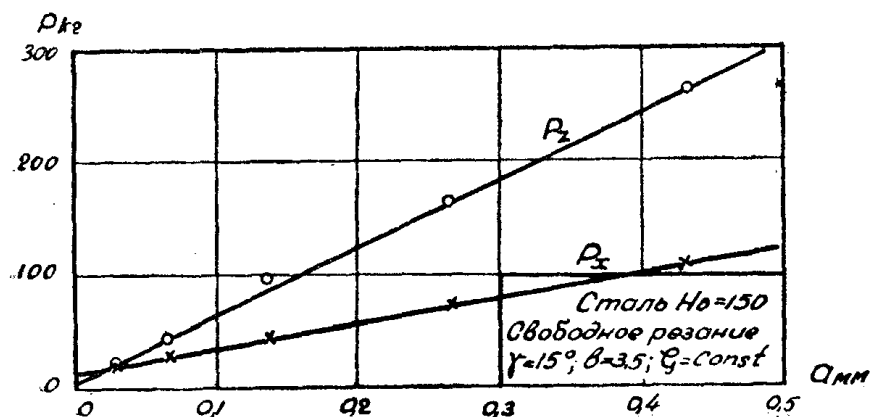


Фиг. 10

Представляет значительный интерес сравнить влияние отдельных переменных процесса резания на силу резания по опытным данным и по уравнению.

Уравнение (15) показывает, что при условии сохранения постоянными σ_0 , n , γ , η , ζ сила резания прямо пропорциональна ширине b и толщине a срезаемого слоя. Постоянству σ_0 , n , γ , η , ζ в случае резания тугоплавких металлов, и в частности сталей, удовлетворяют, как нами было уже ранее показано, режимы постоянной температуры на передней грани резца. В этом случае изменение „ a “ и „ b “ должно согласно уравнению вызывать такое же изменение сил P_1 и P_2 . На фиг. 11 показано влияние толщины срезаемого слоя „ a “ на силы резания при условии сохранения постоянной температуры на передней грани резца. Мы видим, что сила резания в простых пропорциональных координатах выражается в зависимости от „ a “ прямой линией. Правда, эта прямая не проходит через начало координат, а отсекает на оси ординат при $a=0$ некоторый отрезок. Но это имеет место лишь потому, что на фиг. 11 по оси ординат отложены силы P_z и P_x , измеренные динамо-

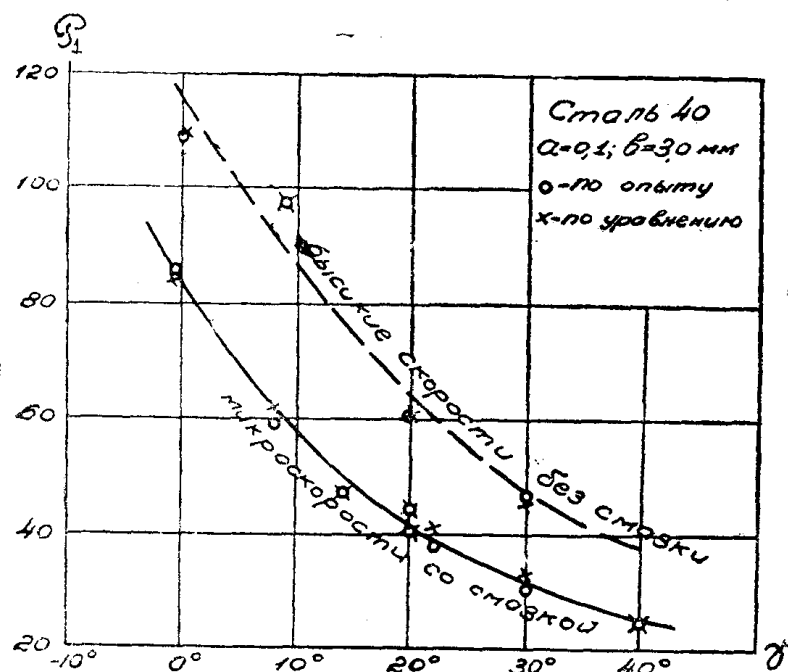
метром и включающие в себя как силы на передней грани, так и силы на задней грани резца. Уравнение же (15) дает лишь силы на передней грани, которые и должны быть при указанных выше условиях пропорциональны толщине среза „ a “. Отрезок на оси ординат при $a=0$ дает величину силы на задней грани.



Фиг. 11

А поэтому фиг. 11 дает то же влияние толщины среза „ a “ на силы резания, что и уравнение (15).

На фиг. 12 представлено влияние переднего угла резца на силу P_1 . Результаты опытов нанесены на график кружками, результаты расчетов по уравнению (15)—крестиками. На фиг. 13 представлено влияние коэффициента трения на силу P_1 . Естественно, что на последней фигуре представлено

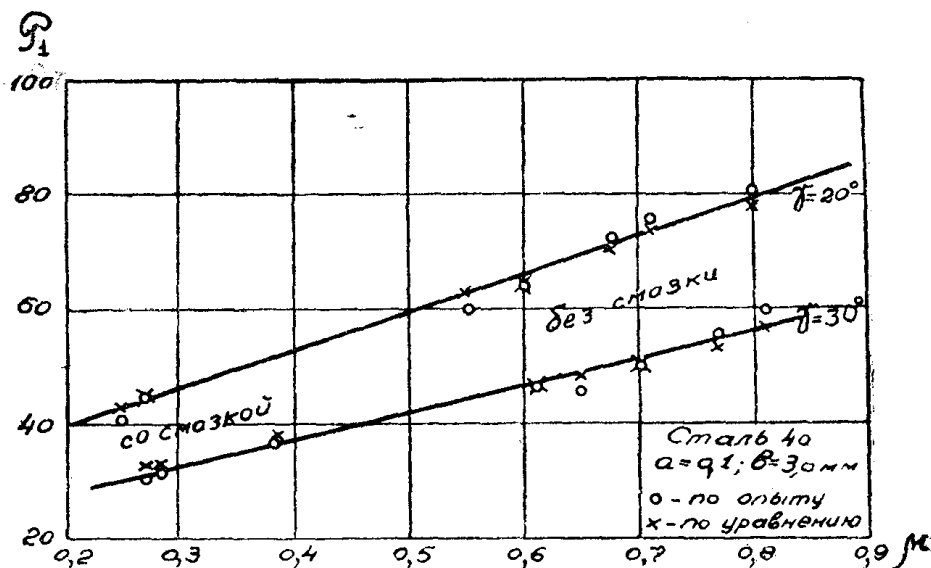


Фиг. 12

влияние на силу P_1 не только собственно коэффициента трения, но и усадки стружки ζ , так как с изменением коэффициента трения в реальном процессе резания неизбежно изменяется и усадка стружки. Фиг. 12 и 13 пока-

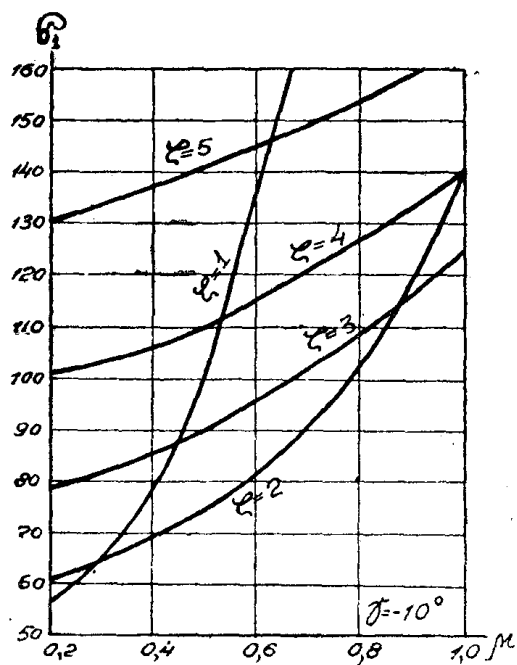
вызывают хорошее совпадение расчетных и опытных значений сил P_1 и, таким образом, также подтверждают правильность уравнения (15).

На фиг. 14, 15, 16, 17 и 18 представлено влияние собственно коэффициента трения μ на силу P_1 , если бы этот коэффициент трения не вызывал изменения усадки стружки ζ . Кривые, нанесенные на этих фигурах, рассчи-

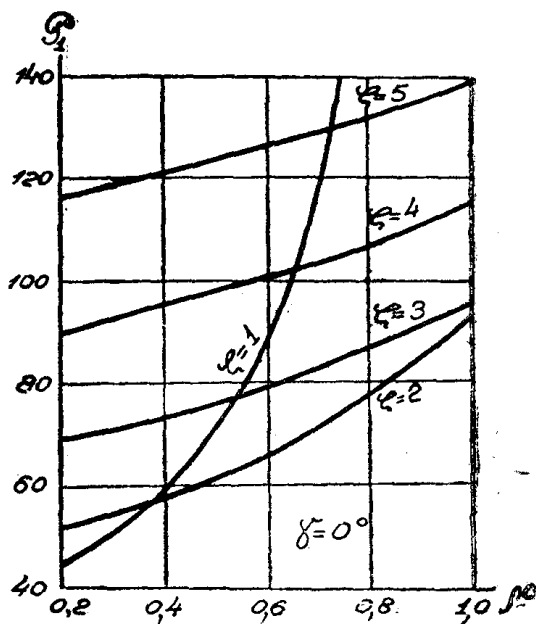


Фиг. 13

таны по уравнению (15). Фигуры показывают, что с увеличением коэффициента трения сила резания увеличивается, причем тем интенсивнее, чем меньше при этом усадка стружки. При постоянном коэффициенте трения сила P_1 обычно тем больше, чем значительнее усадка ζ , но из этого обычного и вполне понятного положения могут быть исключения.

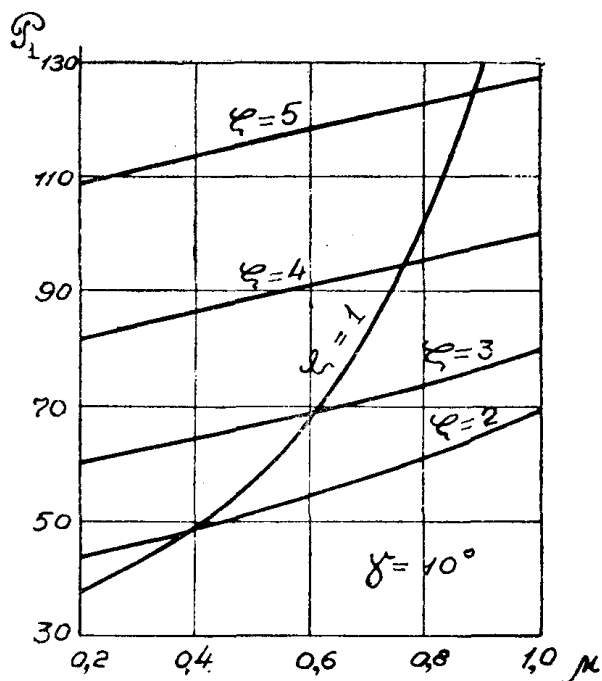


Фиг. 14



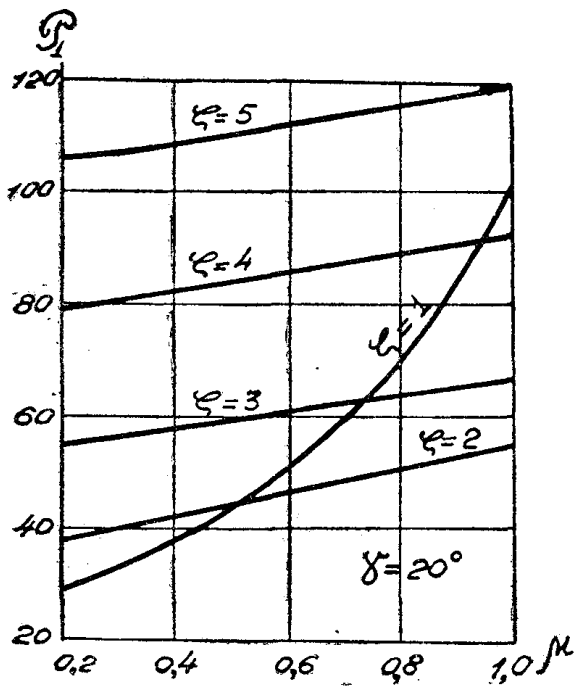
Фиг. 15

Так, из фигур видно, что при усадке $\zeta=1$ и при значительных коэффициентах трения сила P_1 может быть больше, чем при более значительных усадках. Практически в процессе резания такой случай, в котором при меньшей усадке потребовалась бы более значительная сила резания, осуществиться не может, так как это противоречило бы принципу протекания процесса дефор-

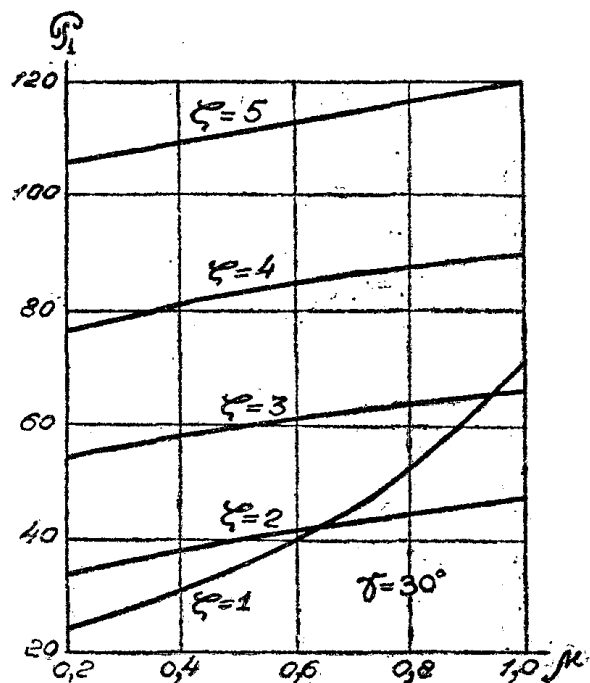


Фиг. 16

мации с наименьшим расходом работы. Теоретически же такой случай, кажущийся парадоксальным, может быть легко объяснен.



Фиг. 17



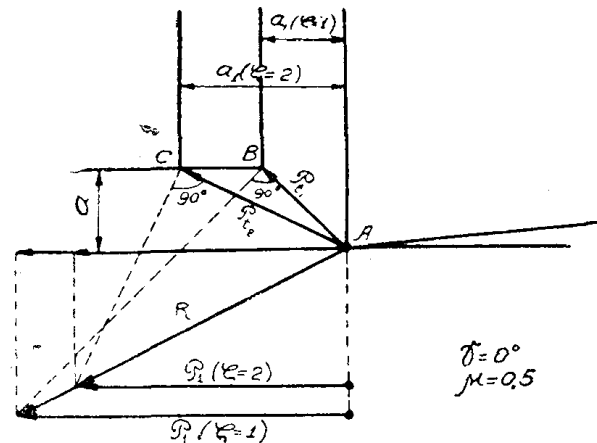
Фиг. 18

На фиг. 19 нами представлен такой случай для $\gamma = 0$, $\mu = 0,5$, $\zeta = 1$ и $\zeta = 2$. P_{t1} — сила сдвига при $\zeta = 1$. P_{t2} — сила сдвига для $\zeta = 2$.

P_{t1} и P_{t2} для простоты нами взяты на графике равными отрезкам AB и AC , т. е. не принято во внимание влияние относительного сдвига на напряжение сдвига ввиду малости этого влияния. Фигура 19 показывает, что, несмотря на то, что $P_{t2} > P_{t1}$, P_1 для $\zeta = 1$ получилось больше, чем для $\zeta = 2$.

Фиг. 14—18 показывают, что при реальных процессах резания, при которых значительные коэффициенты трения вызывают значительные усадки стружки, с увеличением усадки возрастает сила резания P_1 .

Очень важно отметить, что при значительных усадках стружки ($\zeta > 2$), наблюдаемых в процессе резания, влияние собственно коэффициента трения μ (при $\zeta = \text{const}$) на силу резания очень незначительно, так что даже существенная ошибка в определении коэффициента трения при расчете по уравнению (15) дает незначительную ошибку в полученной расчетом силе



Фиг. 19

P_1 . Например, если взять $\gamma = 0$ и $\zeta = 3$, то при переходе от $\mu = 0,5$ к $\mu = 0,75$, т. е. при увеличении μ на 50%, сила P_1 изменяется от 76 кг до 85 кг, т. е. только на 11,8%. Таким образом, оказывается, что для практически достаточно точного расчета силы P_1 по уравнению (15) нет необходимости с большой точностью знать величину коэффициента трения μ и угла трения η , необходимо лишь знать порядок этих величин с точностью $\pm 15 - 20\%$.

2. Опыты по резанию алюминия

На фиг. 20 нами представлена проверка уравнения (15) нашими опытами по резанию алюминия при скорости $V = 0,0075$ м/мин. Резание проводилось таким же образом, как в описанных выше опытах по стали. На фиг. 20 кружочками представлены экспериментально полученные значения сил резания при различных толщинах срезаемого слоя „а“. Крестиками показаны значения сил резания, полученные расчетом по уравнению (15). Для возможности расчета сил резания мы произвели сжатие образцов алюминия (с отношением $\frac{h_0}{d_0} = 2,5$), получили политропу сжатия и из нее определили характеристики $\sigma_0 = 13,8$ и $n = 0,235$.

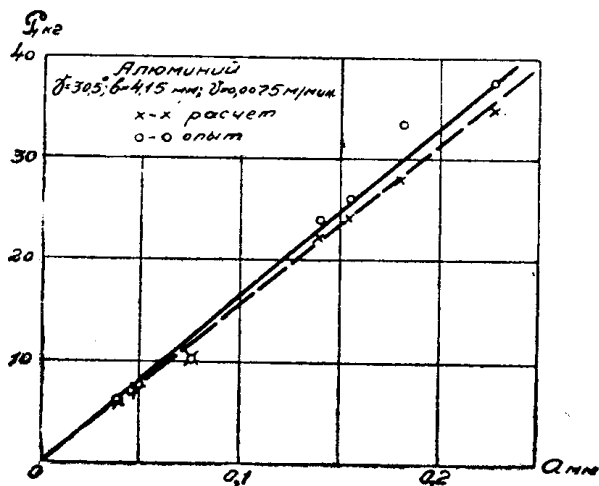
Усадка стружки ζ и угол трения η при резании были определены в опытах по резанию.

Фиг. 20 показывает, что рассчитанные значения силы резания (крестики) расположились немного ниже экспериментальных (кружочки). Возможно, что

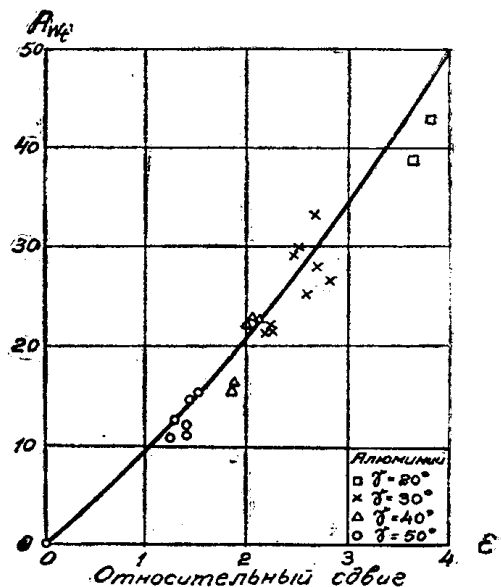
это является результатом различия в скоростях деформации при резании и сжатии, так как при деформации алюминия, как металла сравнительно легкоплавкого, проявляется заметное влияние скорости деформации на напряжение. Во всяком случае и здесь можно констатировать хорошее соответствие рассчитанных и опытных величин.

На фиг. 21 нами представлены опыты по резанию алюминия в координатах $A_{\text{рез}} - \varepsilon$. На этой фигуре даны результаты опытов, проведенных с различными скоростями резания — от 0,02 до 0,76 м/мин, с передними углами от 20 до 50°, при резании как без смазки, так и со смазкой керосином и вазелиновым маслом. Так как при деформации алюминия скорость деформации оказывает заметное влияние на напряжение, то мы для построения графика привели результаты всех опытов к наименьшей скорости, воспользовавшись полученным нами ранее уравнением, отражающим влияние скорости на напряжение при резании алюминия

$$\tau = \tau_0 v^{0,034}.$$



Фиг. 20



Фиг. 21

Сплошная кривая на фиг. 21 проведена по уравнению (20) с подстановкой в него значений σ_0 и n , полученных из опытов по сжатию алюминия. Фиг. 21 показывает, что, несмотря на большой разброс, экспериментальные точки расположились около кривой, своим расположением повторяя ее характер. Значительный разброс экспериментальных точек объясняется неоднородностью алюминия, который был в нашем распоряжении в виде литых болванок, а также и тем обстоятельством, что при резании алюминия на передней грани резца образуется налип металла, затрудняющий перемещение стружки по передней грани и создающий значительные колебания значений сил резания и усадки стружки.

3. Опыты по резанию свинца

Свинец представлял для нас интерес, как металл неупрочняющийся, у которого при постоянном температурно-скоростном режиме деформации напряжение не зависит от степени деформации и является величиной постоянной. Поэтому для свинца при постоянном температурно-скоростном

режиме удельная работа деформации при резании A_{wt} должна быть пропорциональна степени деформации

$$A_{wt} = \tau \varepsilon = \text{const} \cdot \varepsilon$$

и зависимость удельной работы деформации от относительного сдвига должна в графике выражаться прямой линией, проходящей через начало координат. Это положение мы и решили проверить путем опытов, проведенных на микроскоростях.

Опыты проводились со скоростями резания от 0,00025 до 0,106 м/мин, с передними углами 15, 30, 45 и 60° как со смазкой, так и без смазки.

Нами было показано, что при резании свинца скорость деформации значительно влияет на напряжение при резании. Это влияние было выражено зависимостью

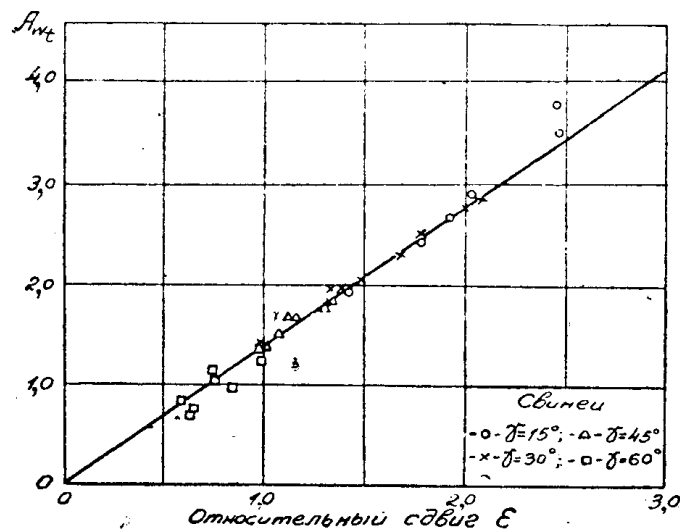
$$\tau = \tau_0 v^{0,102}.$$

Пользуясь этой зависимостью, мы пересчитали напряжения, полученные при резании с различными скоростями, и привели их к самой малой скорости. Приведенные к одной скорости напряжения позволили нам построить по большому числу опытов график

$$A_{wt} = f(\varepsilon).$$

Этот график представлен на фиг. 22.

Точки многочисленных опытов, проведенных при широком диапазоне изменения передних углов, скоростей, степени деформации, хорошо расположились относительно прямой, проходящей через начало координат. Таким



Фиг. 22

образом, наши предположения полностью оправдались, опыты по свинцу подтверждают правильность наших выводов и возможность распространения их и на неупрочняющийся пластичный металл.

4. Проверка наших выводов работами других исследователей

Установление того обстоятельства, что сам по себе коэффициент трения незначительно влияет на силу резания, позволяет нам проверить правильность уравнения для силы резания не только нашими опытами, но и опытами, проведенными в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) под руководством члена-корреспондента Академии наук В. Д. Кузнецова.

В ряде работ, проведенных в СФТИ, измерялись главная составляющая силы резания, усадка стружки и параллельно с этим определялись для того же металла константы политропы сжатия σ_0 и n . Опыты проводились при скорости резания 0,45 м/мин со свободным резанием, без нароста. Ввиду того, что измерялась лишь одна составляющая силы резания (P_z), не представляется возможным непосредственно из опытов определить коэффициент трения. Поэтому мы для расчета силы резания взяли величины коэффициентов трения для аналогичных условий резания (v , a , γ , обрабатываемый материал, смазка) из наших опытов, что может привести лишь к малосущественным ошибкам ввиду указанного выше обстоятельства.

В табл. 3 приведены данные опытов Карповой и Ждановой [11] по резанию и сжатию стали У8, отожженной, а в табл. 4 по резанию и сжатию стали У8, закаленной и отпущенной на сорбит.

Резание в обоих случаях производилось резцом с передним углом $\gamma = 37^\circ$ с применением смазки.

Таблица 3

Сталь У8 отожженная

γ°	b мм ширина среза	v м/мин	a мм толщина среза	ζ	P_z	σ_0	$m = n + 1$
37°	1.52	0.45	0.043	2.1	12.3	92 кг/мм ²	1.1
			0.065	2.05	17.0		
			0.098	2.01	24.9		
			0.123	2.01	31.2		
			0.157	2.09	42.0		
			0.168	2.06	43.0		
			0.197	2.09	51.0		
			0.22	2.2	54.4		
			0.248	2.1	62.1		

Таблица 4

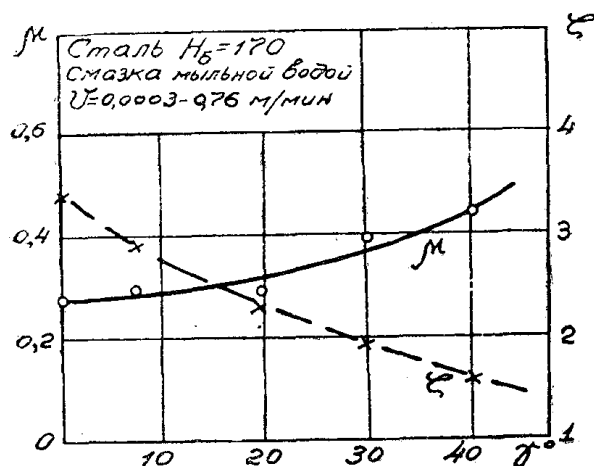
Сталь У8 закаленная и отпущенная на сорбит

γ°	b мм	v м/мин	a мм	ζ	P_z	σ_0	$m = n + 1$
37°	1.52	0.45	0.046	1.62	24	121	1.15
			0.062	1.76	27		
			0.095	2.2	39		
			0.123	2.71	58		
			0.15	2.68	62		
			0.181	2.56	70		
			0.194	2.68	75		
			0.202	2.42	75		
			0.232	2.84	91		

Для расчета силы резания по уравнению (15) мы взяли из наших опытов при микроскоростях для аналогичных условий $\mu = 0,4$.

На фиг. 23 дан график коэффициента трения, являющийся результатом наших опытов по резанию стали 40 ($H_B = 170$) на микроскоростях со смазкой. Из графика видно, что углу $\gamma = 37^\circ$ соответствует $\mu = 0,4$. Конечно, сталь У8 отличается от стали 40 и возможно, что и значения μ для нее будут несколько иными, но если мы обратимся к фиг. 18, то увидим, что даже для $\gamma = 30^\circ$ и $\zeta = 2$ (такое среднее значение усадка имела в опытах СФТИ по стали У8) при колебании значения μ от 0,3 до 0,5 сила резания

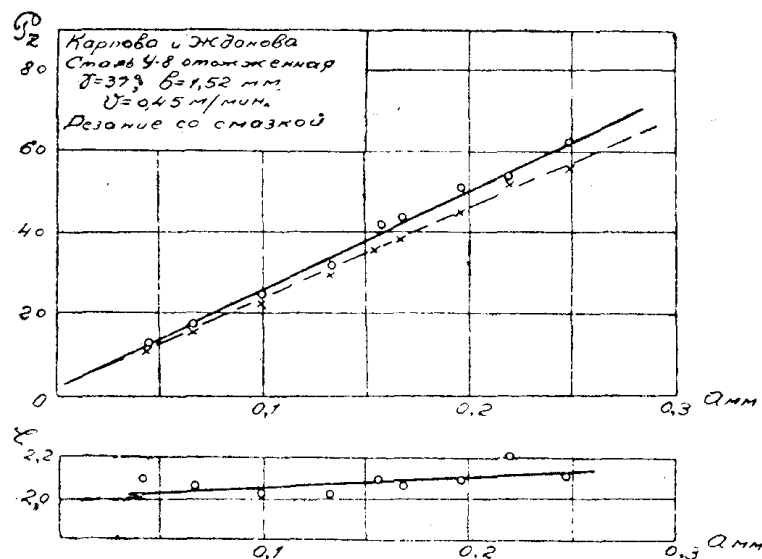
изменяется лишь в пределах 8%, для $\gamma = 37^\circ$ это изменение будет еще меньшим. Кроме этого при $\gamma = 37^\circ$ в наших опытах со сталью 40 усадка была меньше, чем в опытах СФТИ со сталью У8, что позволяет предполагать, что, приняв $\mu = 0,4$, мы можем сделать некоторую ошибку в сторону уменьшения μ .



Фиг. 23

Сопоставление рассчитанной по уравнению силы с полученной экспериментально приведено на фиг. 24 и 25, на которых кружочками показаны экспериментально полученные значения, а крестиками—рассчитанные значения сил.

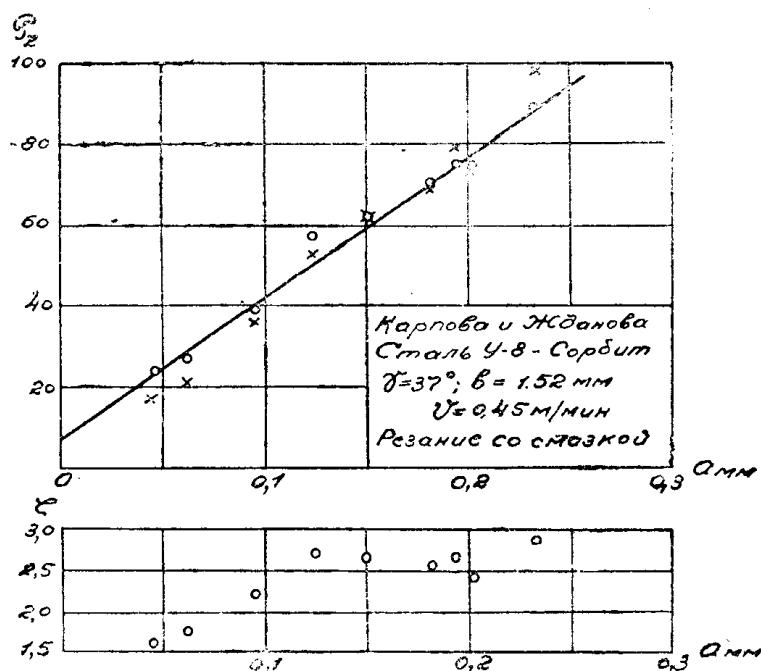
При сопоставлении необходимо принимать во внимание следующее. Опытами определялась сила P_z , включающая в свое значение сумму сил на пе-



Фиг. 24

редней и задней гранях резца. Расположение кружочков на фиг. 24 и 25 показывает, что по ним можно достаточно достоверно провести некоторую среднюю прямую, которая, будучи продолжена до пересечения с осью ординат, отсекает на этой оси величину силы на задней грани. Уравнение 15 дает возможность рассчитать силу только на передней грани. Поэтому для сопоставления опытных и расчетных значений к величине силы, полученной

расчетом мы приплюсовывали отрезок на оси ординат при $a=0$ и полученные таким образом значения выражали на фиг. 24 и 25 крестиками. сопоставление показывает, что получено достаточно близкое совпадение между экспериментальными и расчетными значениями P_z . Для стали У8 отожженной, расчетные значения ниже опытных на 7—8%, для стали У8 (сорбит) расчетные и опытные точки перемешались. Разброс точек для стали У8 сорбит является, повидимому, результатом экспериментальных трудностей, на которые указывают авторы: „Особенно трудным оказалось резание стали У8, обработанной на сорбит... Показания мессдозы были очень неустойчивы и интервал колебаний доходил до 20 мм, что соответствовало 40 кг. При расчетах принималось среднее значение силы резания“ [12].



Фиг. 25

Фиг. 25 показывает, что разброс экспериментальных значений усадки стружки также очень значительный.

В табл. 5 и 6 приведены данные опытов М. А. Большаниной и Ю. А. Студенок по резанию и сжатию алюминия без смазки и со смазкой керосином [13].

Для расчета силы резания мы приняли из наших опытов с алюминием коэффициенты трения для резания без смазки $\mu=1,15$, для резания со смазкой керосином $\mu=0,71$.

Таблица 5

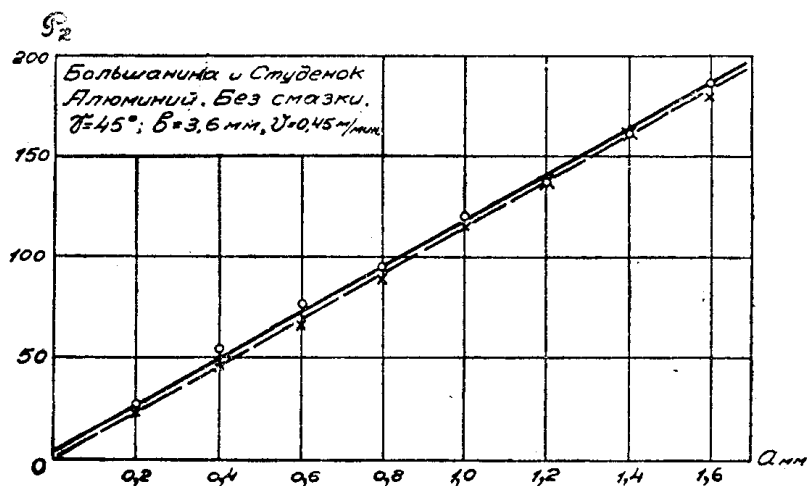
Резание алюминия без смазки

γ°	b мм	v м/мин	a мм	ξ	P_z	σ_0	$m=n+1$
45°	3.6	0.45	0.2	2.54	27.1	15.2	1.09
			0.4	2.48	56.1		
			0.6	2.34	77.3		
			0.8	2.39	95.7		
			1.0	2.43	120.7		
			1.2	2.47	137.7		
			1.4	2.47	161.2		
			1.6	2.37	186.2		

γ°	b мм	v м/мин	a мм	ξ	P_z	σ_0	$m = n + 1$
45°	3.6	0.45	0.2	2.31	21.8	15.2	1.09
			0.4	2.12	44.3		
			0.6	2.26	65.4		
			0.8	2.23	85.8		
			1.0	2.19	96.2		
			1.2	2.25	113.6		
			1.4	1.95	129.1		
			1.6	1.94	151.0		

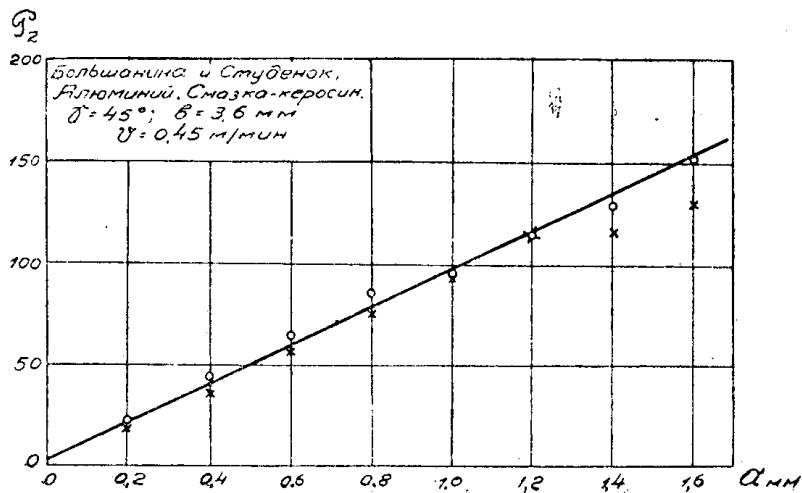
Результаты сопоставлений экспериментальных и расчетных значений сил резания представлены на фиг. 26 и 27. Совпадение получилось очень близким.

Расчетные значения оказались на 5—10% ниже экспериментальных. Следует заметить, что алюминий является металлом, для которого скорость



Фиг. 26

деформации заметно влияет на напряжение. Большанина и Студенок производили сжатие алюминия для определения σ_0 и n при обычной малой скорости деформации, резание же ими производилось при скорости резания $v = 0,4$ м/мин, так что скорость деформации при резании была безусловно



Фиг. 27

выше, чем при сжатии. Как показывают опыты Кунина и Низамовой, при сжатии алюминия с повышением скорости деформации показатель полнотроты сжатия n остается постоянным, а условный предел текучести σ_0 повышается [14].

По опытам Кунина и Низамовой, при переходе от статического сжатия к динамическому (падающим грузом) σ_0 повышается для алюминия на 35%. По опытам Л. Д. Соколова [15], при переходе от скорости сжатия в 1 мм/сек к скорости 2000 мм/сек напряжение при сжатии алюминия возрастает на 28%. Таким образом, если бы мы знали соотношение скоростей деформации при резании и при сжатии в опытах Большаниной и Студенок, то при вычислении силы резания мы должны были бы в уравнение 15 ввести увеличенное значение σ_0 , что повысило бы и значение полученной вычислением силы. На фиг. 26 и 27 рассчитанные значения сил (крестики) расположились бы выше и, вероятно, немного превысили бы значения сил, полученные опытом.

Таким образом можно констатировать, что для стали У8 (в двух ее состояниях) и для алюминия при резании со смазкой и без смазки мы получили удовлетворительное совпадение сил, рассчитанных по уравнению 15, с силами, полученными экспериментальным путем.

Краткие выводы

Теоретический вывод уравнений сил резания и экспериментальная проверка уравнений позволяют сделать следующие заключения:

1. Для процесса резания пластичных металлов оказывается действительным закон независимости удельной работы изменения формы от механической схемы деформации. Этот закон в приложении к процессу резания может быть сформулирован следующим образом:

„При данном температурно-скоростном режиме удельная работа деформации в зоне сдвига стружки однозначно связана со степенью деформации“.

2. Применение этого закона позволило нам вывести уравнения сил резания, включающие в себя физико-механические характеристики обрабатываемого металла.

3. Тщательная экспериментальная проверка выведенных уравнений сил резания показала их достаточную точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин Ю. П. Исследование процесса скоростного резания сталей. Автореферат диссертации, Томск, 1947.
2. Розенберг Ю. А. Исследование процесса резания серого чугуна. Автореферат диссертации, Томск, 1952.
3. Цинитмаш. Книга 15. Новые исследования в области резания металлов. Машгиз, 1948.
4. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением. Металлургиздат, 1947.
- Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическим деформациям. Машгиз, 1949.
- Смирнов-Аляев и Розенберг В. М. Технологические задачи теории пластичности, Лениздат, 1951.
5. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том II. Томск, 1940.
6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том III, стр. 711. Томск, 1944.
7. Там же. Стр. 684, фиг. 519.
8. Там же. Стр. 656, фиг. 510.
9. Розенберг А. М., Определение сил на задней грани резца. Сб. „Вопросы машиноведения и машиностроения“. Западно-Сибирский филиал АН СССР, 1951.
10. Шофман. Экспериментальное исследование холодной и горячей осадки. Цинитмаш. Книга 32, сб. „Новые исследования в области кузнечной технологии“. Машгиз, 1950.
11. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том III, стр. 701–710. Томск, Полиграфиздат.
12. Там же. Глава XXVII, § 18.
13. Там же. Стр. 708.
14. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том II, стр. 622.
15. Журнал технической физики, вып. 5, стр. 543–548, 1947.